

PEMODELAN ELEMEN HINGGA NON LINIER PELAT SATU ARAH BETON BERTULANG BERONGGA BOLA

Dinar Gumilang Jati

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta
Jl. Babarsari 44, Yogyakarta 55281
email: dinar_gj@yahoo.com

Abstract: Spherical hollow concrete slab has been one of alternative technology aimed to reduce the self-weight and save concrete material. The plastic ball placement on concrete tension area should not reduce flexural strength. The non linear concrete material and the presence of plastic balls inside the slab lead to the necessity of numerical solution approach using ATENA software. This research deals with flexural behavior of 12 cm-thick-solid slab (PL0) and hollow sphere slabs with thickness of 12 cm (PB17), which are casted onsite, employing non linear finite element method. Two-point static load testing was applied to the specimen and given by a hydraulic jack. Research parameter study observed the effect of slab void ratio on its flexural behavior. Numerical analysis was performed using ATENA software and supported by GID as the graphical user interface. The observed behaviors on this research are strength, stiffness and ductility. The determination of numerical modeling element affected the analysis result. The comparison of element type indicates that flexural strength of hexahedral solid slab (PL0_NUM_HEX) was closer to experimental result (PL0_EKS) than that of tetrahedral solid slab (PL0_NUM_TET). This research showed that flexural strength of numerical calculation of PL0_NUM and PB17_NUM were respectively 54 kN and 53 kN. Whereas, the flexural strength obtained by experiments of PL0_EKS and PB17_EKS were respectively 43.29 kN and 46.29 kN. Such flexural strength differences occurred because of the ideal condition of numerical modeling. Flexural strength, stiffness, and ductility of spherical hollow concrete slab decreased as the slab void ratio increased.

Keywords : spherical hollow concrete slab, non linear finite element, flexural strength

Abstrak: Pelat beton bertulang berongga bola merupakan salah satu teknologi alternatif yang bertujuan untuk mengurangi berat sendiri struktur dan menghemat material beton. Penempatan bola pada area tarik beton diharapkan tidak akan mengurangi kekuatan lentur pelat tersebut. Kondisi non linier material beton dan keberadaan rongga dalam beton mendorong perlunya permasalahan ini didekati dengan pemecahan numerik menggunakan program ATENA. Pada penelitian ini membahas perilaku lentur pelat solid dengan ketebalan 12 cm (PL0), dan pelat beton bertulang berongga bola dengan ketebalan 12 cm (PB17), dengan sistem beton cor ditempat, menggunakan metode elemen hingga non linier. Pengujian ini menggunakan pembebanan statis dari *hydraulic jack* yang diterapkan pada dua titik beban. Studi parameter penelitian ini mengamati pengaruh rasio rongga pada pelat terhadap perilaku lenturnya. Analisis numerik dilakukan dengan program ATENA dan program GID sebagai *graphical user interface*. Perilaku yang diamati pada penelitian ini antara lain kuat lentur, kekakuan dan daktilitas. Penentuan tipe elemen pada pemodelan numerik mempengaruhi hasil analisisnya. Perbandingan tipe elemen mengindikasikan bahwa kuat lentur pelat solid dengan elemen *hexahedral* (PL0_NUM_HEX) lebih mendekati hasil pengujian eksperimen (PL0_EKS) daripada pelat solid dengan elemen *tetrahedral* (PL0_NUM_TET). Pada penelitian ini didapatkan nilai kuat lentur pengujian numerik pada pelat PL0_NUM dan PB17_NUM berturut turut sebesar 54 kN dan 53 kN. Sementara itu nilai kuat lentur pengujian eksperimen untuk PL0_EKS dan PB17_EKS berturut-turut sebesar 43,29 kN dan 46, 29 kN.. Perbedaan nilai kuat lentur tersebut terjadi karena model numerik mensimulasikan kondisi struktur yang ideal. Kuat lentur, kekakuan dan daktilitas pelat beton berongga bola akan menurun seiring bertambahnya rasio rongga pada pelat.

Kata kunci : pelat beton bertulang berongga bola, analisis elemen hingga non linier, kuat lentur

LATAR BELAKANG

Teknologi alternatif berupa pelat beton bertulang berongga bola (*hollow sphere slab*) merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi struktur pelat beton bertulang. Tujuan dari teknologi tersebut adalah untuk mengurangi berat sendiri pelat dan menghemat material beton. Produk pelat beton bertulang berongga bola yang telah dipatenkan bernama *Bubble-Deck* dengan ketebalan minimum pelat sebesar 23 cm dan umumnya digunakan untuk pelat datar (*flat plate*) dengan sistem semi pracetak.

Pada penelitian ini pelat beton bertulang berongga bola dengan ketebalan 12 cm digunakan sebagai pelat satu arah dengan tumpuan sederhana dan sistem beton cor ditempat. Umumnya daerah tekan beton pada struktur pelat cukup kecil, sehingga penempatan rongga bola pada daerah tarik beton diharapkan tidak mengurangi kapasitas lentur pelat tersebut.

Kondisi material beton yang nonlinier dan keberadaan rongga pada pelat mendorong perlunya permasalahan ini didekati dengan pemecahan secara numerik menggunakan *software* ATENA. ATENA merupakan program analisis nonlinier struktur beton bertulang yang berbasis elemen hingga.

Tujuan penelitian ini untuk mengetahui perilaku lentur, lendutan, kekakuan, daktilitas dan pola retak akibat beban terpusat pada struktur pelat beton bertulang berongga bola.

Penelitian ini juga bermanfaat untuk mengetahui cara pemodelan elemen hingga nonlinier pelat beton bertulang berongga bola dengan program ATENA V2.1.10.

Penelitian ini menggunakan data pembandingan dari pengujian eksperimen yang dilakukan Soeharno (2009). Studi parameter yang diambil adalah pengaruh rasio rongga terhadap perilaku lentur pelat beton bertulang berongga bola.

TINJAUAN PUSTAKA

Aldejohann dan Schnellenbach (2005), menyebutkan secara umum pelat beton berongga bola (*Bubble-Deck*) memiliki perilaku lentur yang sama dengan pelat beton solid, dan dapat menghemat volume beton hingga sekitar 30%.

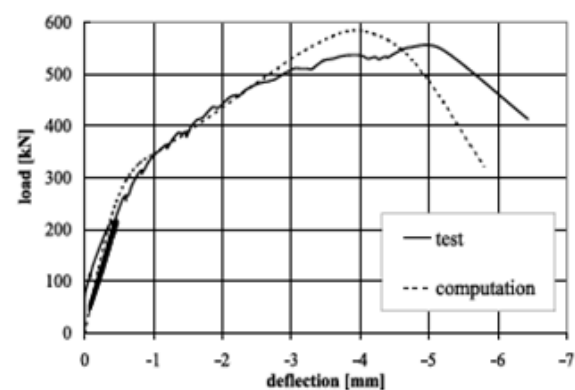
Perbedaan utama antara pelat beton berongga bola dengan pelat solid adalah ketahanan terhadap geser dimana analisis kuat geser pelat berongga dalam DIN 1045-1 ditentukan berdasarkan jarak antar bolanya.

Schnellenbach (2002), memodelkan mekanisme keruntuhan *Bubble-Deck* akibat geser pada area kolom dengan *punching test*.

Penelitian dilakukan secara eksperimen dan numerik. Pengujian numerik menggunakan *software* elemen hingga nonlinier DIANA.

Penulangan dimodelkan secara *embedded* dengan asumsi lekatan *perfect bond* antara material beton dan baja tulangan.

Hasil perbandingan uji eksperimen dan numerik dapat dilihat pada Gambar 1.



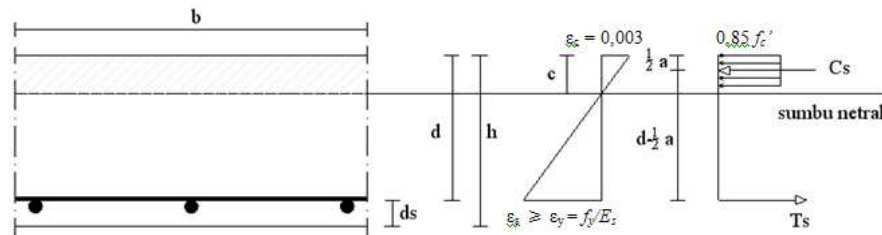
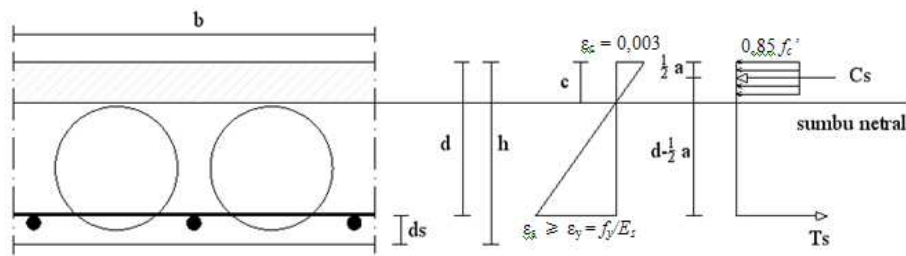
Gambar 1. Grafik Beban - Lendutan (Schnellenbach, 2002)

Soeharno (2009), melakukan pengujian lentur secara eksperimen terhadap pelat beton bertulang berongga bola ketebalan 12 cm, dengan sistem satu arah dan sistem beton cor ditempat. Didapatkan kapasitas lentur pelat seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Kapasitas beban pelat eksperimen (Soeharno, 2009)

Benda Uji	Dimensi (p.l.t) (m)	Vol. Beton (%)	Beban Retak Awal		Beban Maksimum	
			Beban (kN)	(%)	Beban (kN)	(%)
PL-1	2,2x1,1x0,12	100	21,29	100	43,29	100
PL-2	2,2x1,1x0,120	83	11,29	53	46,29	107
PL-3	2,2x1,1x0,143	100	15,29	72	68,29	158

LANDASAN TEORI

**Gambar 2.** Diagram tegangan-regangan penampang pelat solid**Gambar 3.** Diagram tegangan-regangan penampang pelat berongga bola

Kuat Lentur

Pada kondisi *under reinforced*, tulangan baja telah mengalami leleh ($f_s = f_y$), sehingga berlaku persamaan di bawah ini.

$$C_c = T_s$$

(1)

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \quad (2)$$

dimana :

$$a = \beta_1 \cdot c \quad (3)$$

$$T_s = A_s \cdot f_y \quad (4)$$

Sehingga momen penampang dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$M_n = T_s \left(d - \frac{1}{2} a \right) = C_c \left(d - \frac{1}{2} a \right) \quad (5)$$

Secara teoritis, apabila terdapat rongga pada beton berbentuk bola di bawah daerah tekan tentunya tidak akan mengurangi kemampuan pelat dalam menahan lentur, seperti terlihat pada Gambar 3.

Kekakuan Lentur

Kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu lendutan sebesar satu satuan (Gere dan Timoshenko, 1987), seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 6.

$$K = \frac{P_{cr}}{\delta_{cr}}$$

(6)

dengan:

K = kekakuan pelat (kN/mm)

P_{cr} = beban saat retak awal (kN)

δ_{cr} = lendutan saat retak awal (mm)

Daktilitas

Daktilitas struktur beton bertulang dapat ditentukan dari rasio lendutan saat beban ultimit terhadap lendutan saat tulangan baja mulai leleh (Priestley dan Paulay, 1992), sesuai dengan Persamaan 7.

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

(7)

dengan

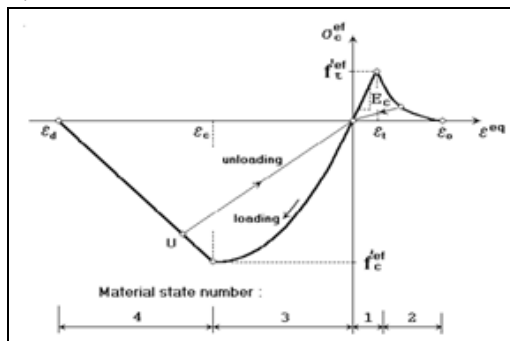
μ = displacement ductility factor

δ_u = lendutan saat leleh (mm)

δ_y = lendutan ultimit (mm)

Model Konstitutif Beton

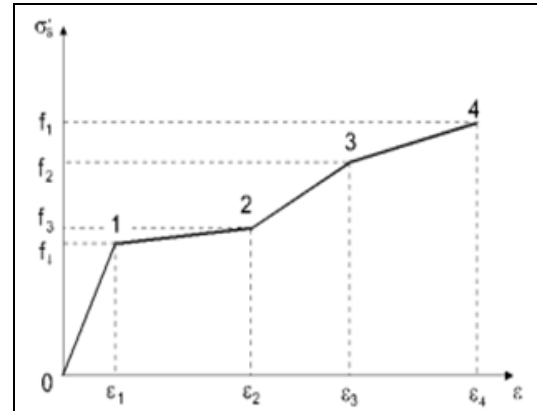
Perilaku nonlinier beton pada tegangan biaxial dideskripsikan dengan tegangan efektif (σ_e) dan regangan uniaksial ekuivalen (ϵ_e). Diagram tegangan-regangan uniaksial ekuivalen untuk beton dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hukum tegangan-regangan uniaksial beton (ATENA Theory, 2011)

Model Konstitutif Baja Tulangan

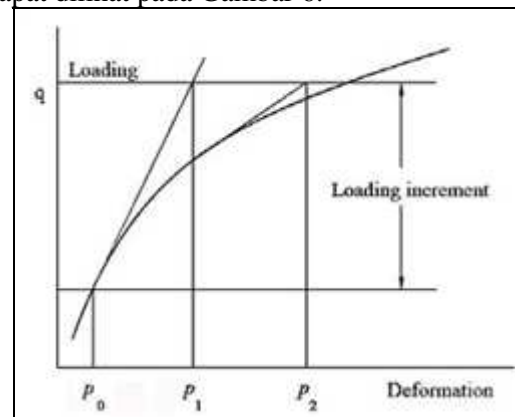
Di dalam pemodelan ATENA, model hubungan tegangan-regangan untuk baja tulangan dimodelkan dengan hukum multi linier, seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Hukum tegangan-regangan baja tulangan multi linier (ATENA Theory, 2011)

Analisis Non linier

Konsep solusi penyelesaian persamaan nonlinier dengan metode Newton-Raphson dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Metode Newton-Raphson (ATENA Theory, 2011)

METODOLOGI

Benda Uji dan Studi Parameter

Pelat yang dimodelkan terdiri dari 2 buah benda uji eksperimen dan 2 buah studi parameter dengan variasi rasio rongga. Spesifikasi benda uji seperti terlihat pada tabel 2.

Penerapan jenis material, kondisi batas, dan pembebanan model disesuaikan dengan pengujian eksperimen. Pemodelan dan analisis data dilakukan dengan menggunakan program komputasi yaitu GID V7.4.4b dan ATENA V2.1.10.

Pemodelan Beton

Dalam ATENA geometri beton dapat dimodelkan sebagai elemen *hexahedral* (CCIsoBrick) dan elemen *tetrahedral* (CCIsoTetra).

Pada penelitian ini elemen *hexahedral* hanya digunakan sebagai pembanding performa kedua jenis elemen, sementara itu untuk analisis numerik dan studi parameter pelat beton bertulang berongga bola digunakan elemen *tetrahedral*, hal tersebut dilakukan karena

geometri rongga bola dalam pelat hanya bisa dilakukan menggunakan tipe elemen *tetrahedral* (CCIsoTetra).

Material beton pada eksperimen ini dimodelkan sebagai material *Concrete* dengan jenis *material proto type CC3DonLinCementious2*, dengan parameter material seperti yang terlihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Spesifikasi Beda Uji dan Studi Parameter

Benda uji	Ø Bola (mm)	Dimensi (mm)	Tulangan (mm)		Rasio Rongga (%)	Keterangan
			Pokok	Susut		
PL0 (solid)	-	2200x1100x120	Ø7,6-100	Ø5,5-100	0	Eksperimen (PL1)
PB17	76	2200x1100x120	Ø7,6-100	Ø5,5-100	17	Eksperimen (PL2)
PB19	80	2200x1100x120	Ø7,6-100	Ø5,5-100	19	Studi Parameter
PB28	90	2200x1100x120	Ø7,6-100	Ø5,5-100	28	Studi Parameter

Tabel 3. Parameter Material Beton

Parameter	Persamaan	Besaran	Satuan
Kuat Tekan	f_c'	-25.88	MPa
Kuat Tekan Kubus	$f_{ck}' = \frac{f_c'}{0.85}$	-30,44	MPa
Modulus Elastisitas	$E_c = 4700 \sqrt{f_c'}$	23910	MPa
Poisson Ratio	ν	0,20	
Kuat Tarik	$f_t = 0.24 f_{ck}'^{2/3}$	2,34	MPa
Fracture energy	$G_f = 0.000025 f_t$	5.85×10^{-5}	MN/m
Plastic strain	$\epsilon_{cp} = \frac{f_t}{E_c}$	-0.00106	-
Onset of crushing	$f_c^0 = \frac{2}{3} f_c'$	-17.25	-
Density	ρ	0,022	MN/m ³

Pemodelan Baja Tulangan

Geometri baja tulangan dimodelkan secara diskrit dengan tipe elemen *line* (CCIsoTruss) dengan asumsi perfect bond antara material baja tulangan dengan material betonnya. Material baja tulangan dimodelkan sebagai material *Reinforcement* dengan jenis material *prototype CCReinforcement*. Parameter kuat tarik baja tulangan menggunakan diagram tegangan-

regangan multi-linier hasil idealisasi pengujian kuat tarik baja tulangan seperti pada Gambar 7.

PEMBAHASAN

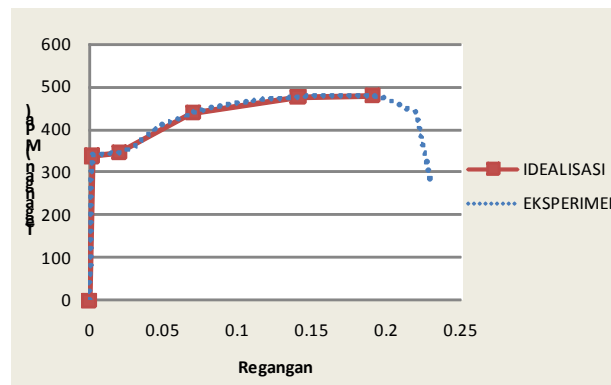
Elemen hexahedral dan tetrahedral

Perbandingan tipe elemen hanya dilakukan untuk pelat solid (PL0), dan digunakan untuk

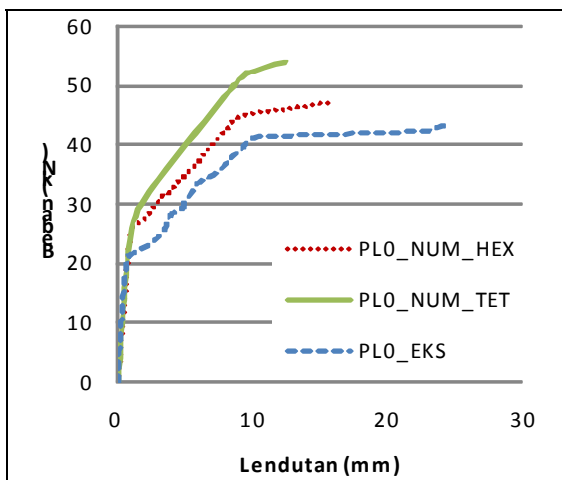
melihat performa kedua jenis elemen. Hasil perbandingan dapat dilihat pada Gambar 8. Benzley (1995), menyatakan bahwa elemen hexahedral dapat mengalami deformasi pada energi yang lebih rendah dibandingkan dengan elemen tetrahedral, hal tersebut yang membuat elemen hexahedral lebih akurat daripada elemen tetrahedral. Pada penelitian ini volume beton semua benda uji menggunakan elemen tetrahedral, hal ini dikarenakan pelat berongga bola tidak dapat menerapkan elemen hexahedral.

Model Numerik dan Eksperimen

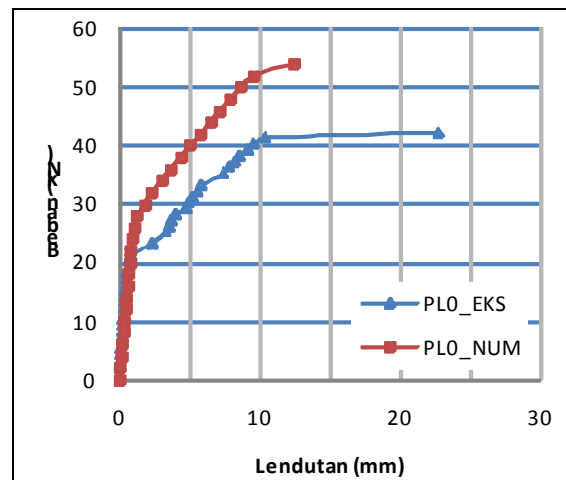
Hasil kuat lentur pelat model numerik dan eksperimen dapat dilihat dari grafik perbandingan nilai kapasitas beban dan nilai lendutan pada Gambar 9 dan Gambar 10. Perbandingan nilai kekakuan dan nilai daktilitas pelat numerik dan eksperimen dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.



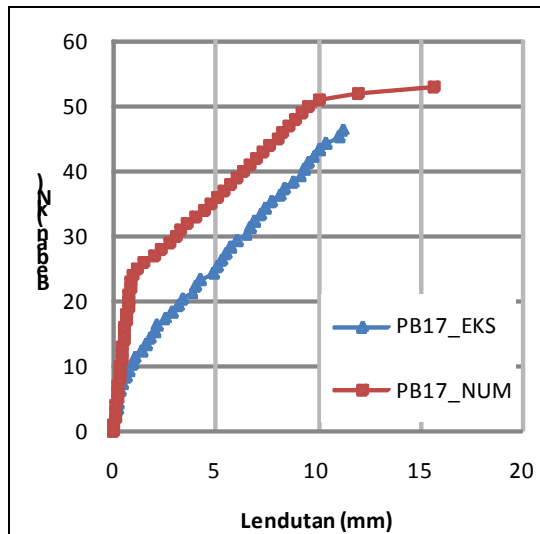
Gambar 7. Hubungan tegangan-regangan baja tulangan



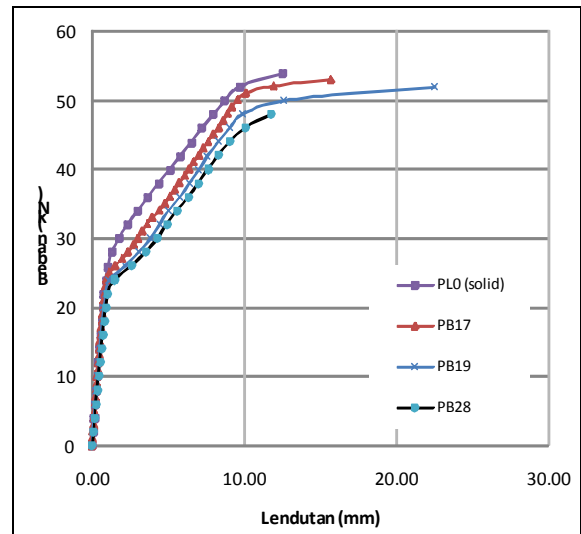
Gambar 8. Grafik hubungan beban-lendutan pelat solid (PL0)



Gambar 9. Grafik hubungan beban-lendutan pelat PL0 (solid)



Gambar 10. Grafik hubungan beban-lendutan pelat berongga PB17



Gambar 11. Grafik hubungan beban-lendutan studi parameter model numerik

Tabel 4. Perbandingan kekakuan hasil analisis numerik dan eksperimen

Benda Uji	P_{awal} (kN)		δ_{awal} (mm)		Kekakuan (kN/mm)	
	Eksperimen	ATENA	Eksperimen	ATENA	Eksperimen	ATENA
PL1	2,29	2,00	0,05	0,0693	45,80	28,86
PL2	2,29	2,00	0,16	0,0716	14,31	27,93

Tabel 5. Perbandingan daktilitas hasil analisis numerik dan eksperimen

Benda Uji	δ_y (mm)		δ_u (mm)		Daktilitas ($\delta u/\delta y$)	
	Eksperimen	ATENA	Eksperimen	ATENA	Eksperimen	ATENA
PL1	2,37	3,64	24,14	12,46	10,19	3,42
PL2	10,11	6,68	11,22	15,64	1,11	2,34

Tabel 6. Nilai kekakuan pelat

Benda Uji	P_{awal} (kN)	δ_{awal} (mm)	Kekakuan (kN/mm)	Persentase (%)
PL0 (solid)	2	0,0693	28,86	100
PB17	2	0,0716	27,93	96,78
PB19	2	0,0737	27,17	94,14
PB28	2	0,0879	22,75	78,83

Tabel 7. Daktilitas pelat

Benda Uji	δ_y (mm)	δ_u (mm)	Daktilitas $\delta u/\delta y$	Persentase (%)
PL0 (solid)	3,64	12,46	3,42	100

PB17	6,68	15,64	2,34	68,42
PB19	7,43	17,30	2,33	68,13
PB28	7,62	11,75	1,54	45,03

Studi Parameter Model Numerik

Dari pemodelan numerik yang ada maka dibuat studi parameter pada pelat beton berongga bola, dengan variasi rasio rongga pada pelat.

Nilai kapasitas beban mengalami penurunan seiring bertambahnya rongga dalam pelat beton bertulang, seperti yang terlihat pada Gambar 11.

Semakin besar rasio rongga dalam pelat maka inersia penampang efektif pelat akan semakin berkurang, sehingga dapat mengurangi kekakuan pelat tersebut. Hasil kekakuan studi parameter dapat dilihat pada Tabel 6.

Pelat beton bertulang berongga bola akan mengalami penurunan nilai daktilitas seiring bertambahnya rasio rongga pada pelat. Perbandingan nilai daktilitas studi parameter dapat dilihat pada Tabel 7.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut ini : (1) Perbedaan tipe elemen, kerapatan mesh dan jumlah elemen pada pemodelan numerik sangat mempengaruhi hasil analisisnya. Pada pemodelan pelat solid (PL0), persentase selisih nilai beban retak pertama pelat PL0_NUM_HEX (linear hexahedral) terhadap PL0_EKS sebesar 1%, sementara itu untuk PL0_NUM_TET (linear tetrahedral) mempunyai persentase selisih sebesar 15%. Persentase selisih nilai beban ultimit PL0_NUM_HEX terhadap PL0_EKS sebesar 9%, sementara itu untuk pelat PL0_NUM_TET sebesar 25%. (2) Nilai beban ultimit pada pengujian eksperimen untuk pelat PL0 (solid) dan PB17 berturut-turut sebesar 43,29 kN; 46,29 kN, sementara itu pada pengujian numerik nilai beban ultimitnya berturut-turut sebesar 54 kN; 53 kN. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pengujian numerik mensimulasikan kondisi struktur yang sangat ideal. (3) Semakin besar rasio rongga pada pelat maka kapasitas lenturnya akan semakin

berkurang, hal ini dapat disebabkan karena pada pelat berongga bola terjadi kombinasi kerusakan lentur dan geser akibat dari kemampuan geser pelat yang berkurang. Pelat PB28 mengalami penurunan kapasitas lentur yang cukup besar bila dibandingkan dengan pelat PB17, hal ini akibat dari posisi rongga bola pada pelat PB28 telah melampaui blok tekan (*stress block*) pada betonnya. (4) Pertambahan rasio rongga pada pelat beton bertulang berongga bola akan mengurangi nilai kekakuan dan daktilitasnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldejohann, M. and Schnellenbach, M., 2005, *Biaxial Hollow Slabs, Theory and Test*, Betonwerk + Fertigteil-Technik Vol. 71 Page 50-59, German.
- Benzley, S. E., 1995, "A Comparison of All Hexagonal and All Tetrahedral Finite Element Meshes for Elastic and Elasto-plastic Analysis", Brigham Young University, Utah, United States.
- Cervenka, V., Jendele, L., dan Cervenka, J., 2011, *ATENA Program Documentation Part 1 Theory*, Cervenka Consulting, Praha.

- Gere dan Timoshenko, 1987, *Mekanika Bahan Jilid 1*, Erlangga, Jakarta.
- Priestley M. J. N. dan Paulay, T., 1992, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- Schnellenbach, M., 2002, "Punching Behavior of Biaxial Hollow Slabs", Darmstadt University of Technology, Germany.
- Soeharno, A., 2009, *Perilaku Lentur Pelat Sistem Satu Arah Beton Bertulang Berongga Bola*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.